

孔锋, 吕丽莉, 孙劭, 等. 地球工程对中国极端降雨致灾人口风险的影响研究[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 99–106, 134.
[KONG Feng, LU Lili, SUN Shao, et al. Impact of geoengineering on population risk of extreme rainfall in China[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 99–106, 134. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.019.]

地球工程对中国极端降雨致灾人口风险的影响研究^{*}

孔 锋^{1,2,3}, 吕丽莉^{2,3}, 孙 劭⁴, 王 品⁵, 辛 源²

(1. 清华大学 公共管理学院 应急管理研究基地, 北京 100084; 2. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081;
3. 中亚大气科学研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 4. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081;
5. 杭州师范大学理学院遥感与地球科学研究所 浙江 杭州 311121)

摘 要: 在地球工程对中国极端降雨致灾因子危险性影响的研究基础上, 采用 BNU-ESM 模式的地球工程(G4 试验)和非地球工程(RCP4.5)日值降雨数据, 以日均值降雨量的 95% 分位数定义极端降雨事件。同时结合 IPCC SSP3 情景下的中国分省人口数据, 评估了中国极端降雨灾害受影响人口风险, 并对两种情景下的风险进行对比分析。结果表明: 地球工程能够有效降低中国整体极端降雨灾害受影响人口风险, 且实施期间的降低作用高于实施结束期。两种情景下中国极端降雨灾害受影响人口风险的区域差异增大, 地球工程未能改变中国极端降雨灾害受影响人口风险的相对格局, 表明在当前 GeoMIP 模式设定的地球工程实施当量下, 人类能够有效降低气候变化风险, 且不影响区域气候相对格局。

关键词: 地球工程; 极端降雨灾害; 人口风险; 区域差异; 重现期; 中国

中图分类号: X43; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)01-0099-09

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.019

地球工程, 也称气候工程^[1-3], 是近年来全球气候治理谈判和气候变化政策研究中的热议话题之一^[4-6]。地球工程作为人类干扰全球气候变暖, 人为给大气降温的最直接手段, 在后《巴黎协定》时代, 假如 1.5℃ 和 2℃ 温控目标越来越被证明难以实现, 地球工程是否会被考虑纳入气候行动框架^[7-10]? 加之全球气候变暖背景下全球多地近年来极端天气气候事件频发^[11-14], 给不同地区的可持续发展带来了严峻挑战^[15-17]。因此, 探讨地球工程对未来区域极端天气气候以及由此导致的灾害风险格局的影响, 具有十分重要的科学意义和政策需求^[7,18]。荷兰大气化学家保罗·约瑟夫·克鲁岑(Paul Jozef Crutzen), 由于证明了氮的氧化物会加速平流层中保护地球不受太阳紫外线辐射的臭氧的分解, 获得 1995 年诺贝尔化学奖^[19]。在此研究基础上, 克鲁岑引入了“人类世”(Anthropocene)的概念, 即地球环境越来越受到人类活动影响的一个新的地质时期, 并据此提出在全球变暖背景下, 在平流层注入气溶胶以应对全球气候变暖的设想^[20]。由此开启了进入 21 世纪来地球工程应对全球气候变化的大争论。IPCC 在 2011 年第一次召开地球工程主题的会议, IPCC AR4 和 IPCC

AR5 中涉及地球工程的内容, 并探讨地球工程的技术和治理问题^[11,13,21]。但目前学界对地球工程的主要担忧之处并不是它的有效性, 而是它的副作用^[22-27]。地球工程会破坏区域天气气候模式和季风系统, 这对依赖可预测的季节周期来完成农业等任务的部门来说是一个棘手的问题^[22,24-25]。国内外对地球工程的探讨多集中在政策分析和伦理研究的方面^[23,26-30], 而从数值模拟入手开展地球工程影响的定量研究相对较少, 尤其是国内尚处于起步阶段。在 2018 年《灾害学》第 2 期, 笔者首先从开展了“气候工程对中国极端降雨强度的影响”研究^[7], 从致灾因子角度深入分析了地球工程对中国极端降雨时空格局可能产生的影响。在此基础上, 为了进一步拓展和深化地球工程情景下极端降雨对未来社会经济风险的影响, 依据现有的资料条件, 我们开展了地球工程和非地球工程两种情景下的未来中国地区极端降雨灾害人口风险研究, 并对两种情景下的风险差异特征对比分析。该研究的意义一方面将地球工程的影响拓展到人类社会经济生活, 深化相关认识; 另一方面期望结果能够引起地球工程相关者的关注, 为国际气候谈判和政策制定提供可能的参考。

^{*} 收稿日期: 2018-06-11 修回日期: 2018-08-15

基金项目: 国家重大科学研究计划(2015CB953603); 国家自然科学基金项目(41801064; 71790611; 41701103; 41775078); 中国气象局气候变化专项项目(CCSF201843; CCSF201844); 中亚大气科学基金(CAAS201804)

第一作者简介: 孔锋(1986-), 男, 山西临汾人, 博士后, 助理研究员, 主要研究方向为气候变化与自然灾害。

E-mail: kongfeng0824@foxmail.com

1 数据和方法

本文采用的数据主要包括以下四类：①2008 – 2015 年的 17 399 条中国县级尺度极端降雨灾害受影响人口数据来自中国气象局国家气候中心灾情数据库，该数据表征了不同极端降雨强度下的受影响人口和死亡人口。②2006 – 2100 年非地球工程情景下的中国日值降水数据是在 RCP4.5 情景下，基于 BNU – ESM 模式 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 空间分辨率模拟结果，通过统计降尺度即双线性插值和 ISIMIP 矫正得到结果，数据包含 125×105 个格网数据，其经度范围是 $73.25^{\circ} \sim 135.25^{\circ}\text{E}$ ，纬度范围是 $3.25^{\circ} \sim 53.75^{\circ}\text{N}$ 。其中 BNU – ESM 模式的强迫数据采用的是 1970 年 – 1999 年的日值观测数据。③同时段地球工程情景下的中国日值降水数据则是 G4 地球工程试验结果，即 2020 – 2069 年在大气平流层中注射硫酸盐气溶胶以反射太阳辐射的试验。2070 年地球工程停止，BNU – ESM 模式继续运行至 2100 年。④本文采用的 2050 年和 2100 年的人口数据是基于 IPCC 共享社会经济路径中的 SSP3，即局部或不一致发展路径，该发展路径下未来区域差异特征明显，贫富差距大，未能实现发展目标，对化石燃料依赖较大。该数据由我国学者姜彤团队模拟建立，详细内容可参见文献[31]。IPCC SSP3 路径是具有较大减排压力的高挑战路径，也是实施地球工程最迫切的路径[31]。因此，本文选取 SSP3 路径。本文采用的主要方法包括：线性回归、极值拟合(包括高斯正态分布(Gaussian)、韦伯分布(Weibul)、伽马分布(gamma)、

广义极值分布(GEV)和广义帕累托分布(GP))、Kolmogorov – Smirnov (KS) 检验、图谱对比分析等方法，这些方法均在地理学和气象学中得到了广泛的应用[32–34]。本文的极端降雨的阈值是日值降雨量的 95% 分位数[7]。

2 基于历史灾情的中国极端降雨灾害受影响人口时空变化特征

从时间序列来看，为表征 2008 – 2015 年全国尺度的极端降雨灾害受影响人口和死亡人口时空变化特征，本文按照年份累加统计 2008 – 2015 年逐年的极端降雨灾害受影响人口和死亡人口。从图 1 可以看出 2008 – 2015 年中国极端降雨灾害受影响人口和死亡人口均呈减少趋势。其中除 2010 年外，中国极端降雨灾害受影响人口大致在 1 亿人左右，死亡人口在 1 000 人左右。

从空间分布来看，为表征极端降雨致灾人口数量特征，本文累加统计 2008 – 2015 年中国各级行政单元的极端降雨灾害受影响人口和死亡人口。从图 2 可以看出，2008 – 2015 年中国极端降雨灾害受影响人口具有明显的南高 – 北低和东高 – 西低的空间格局。其中四川、湖北、湖南、安徽、江西、广东和广西 7 个省份的受影响人口超过了 3 500 万人。中国极端降雨灾害死亡人口则呈现出东部较低 – 中部最高 – 西部居中的空间格局。其中甘肃、陕西、湖北、湖南、广东和广西 6 个省份的死亡人口超过了 500 人。

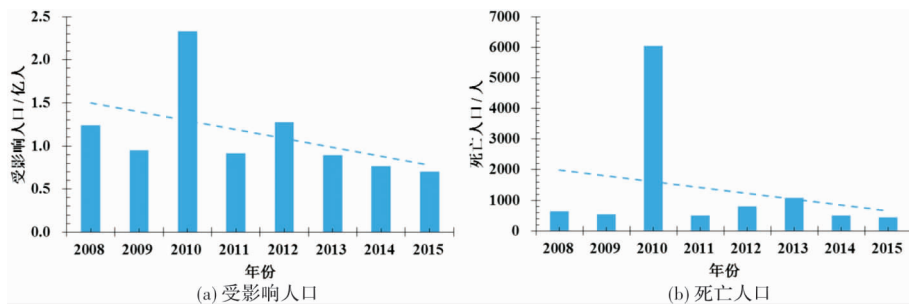


图 1 2008 – 2015 年全国尺度受极端降雨影响人口及死亡人口的变化趋势

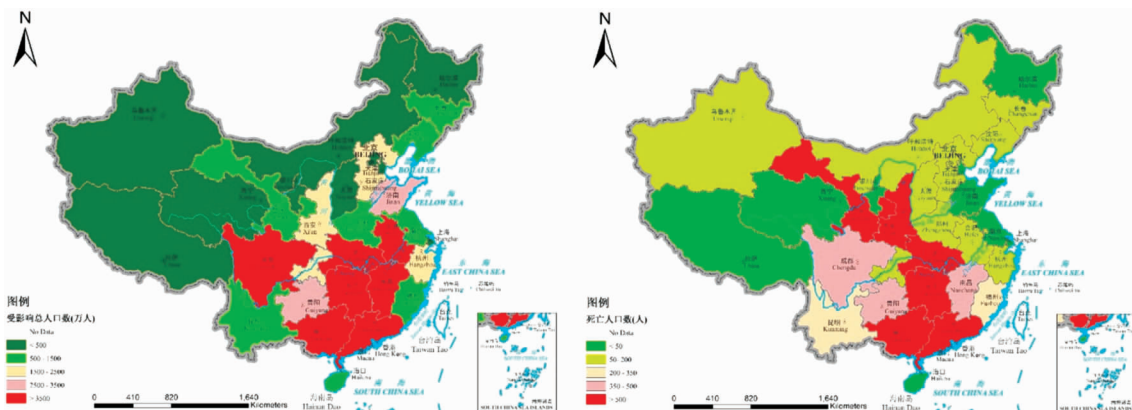


图 2 2008 – 2015 年全国受极端降雨影响人口及死亡人口的空间分布特征

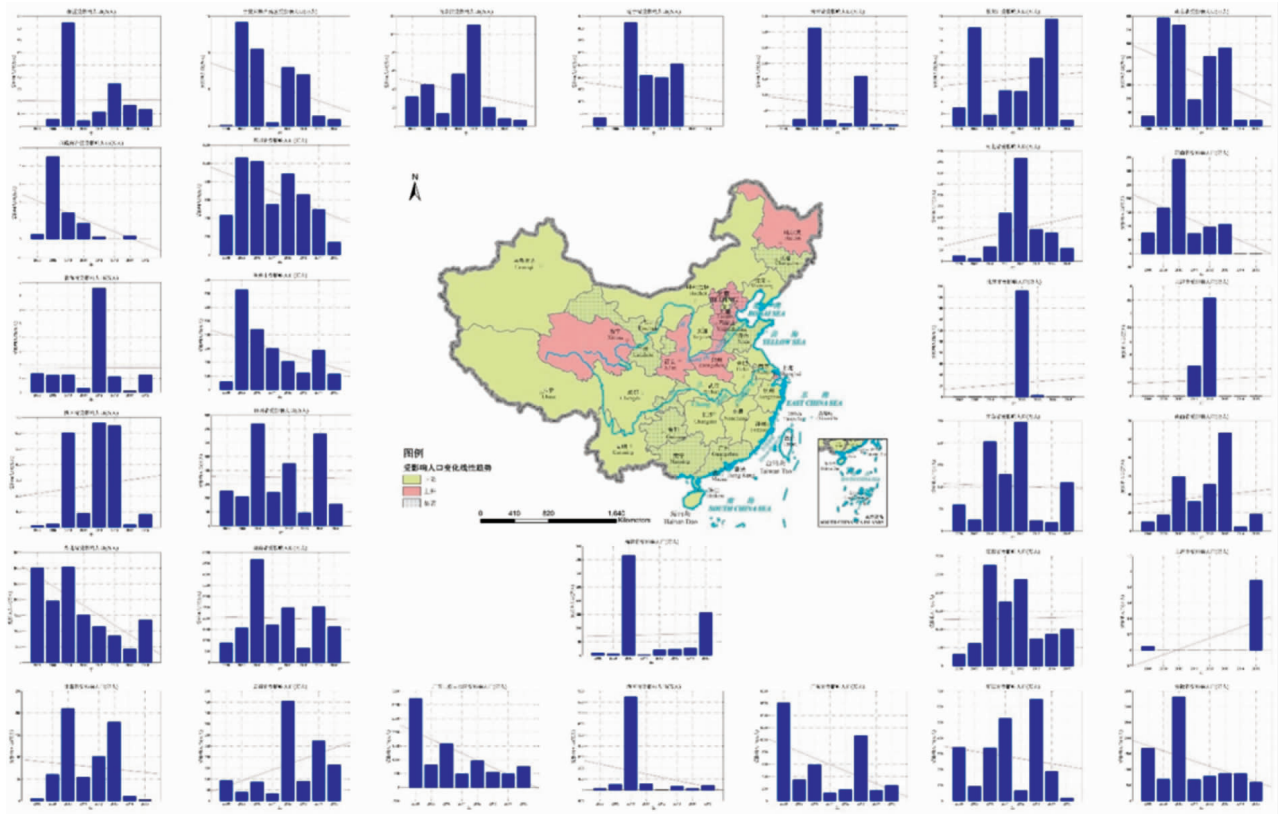


图3 2008-2015年中国省级尺度受极端降雨影响人口的变化趋势

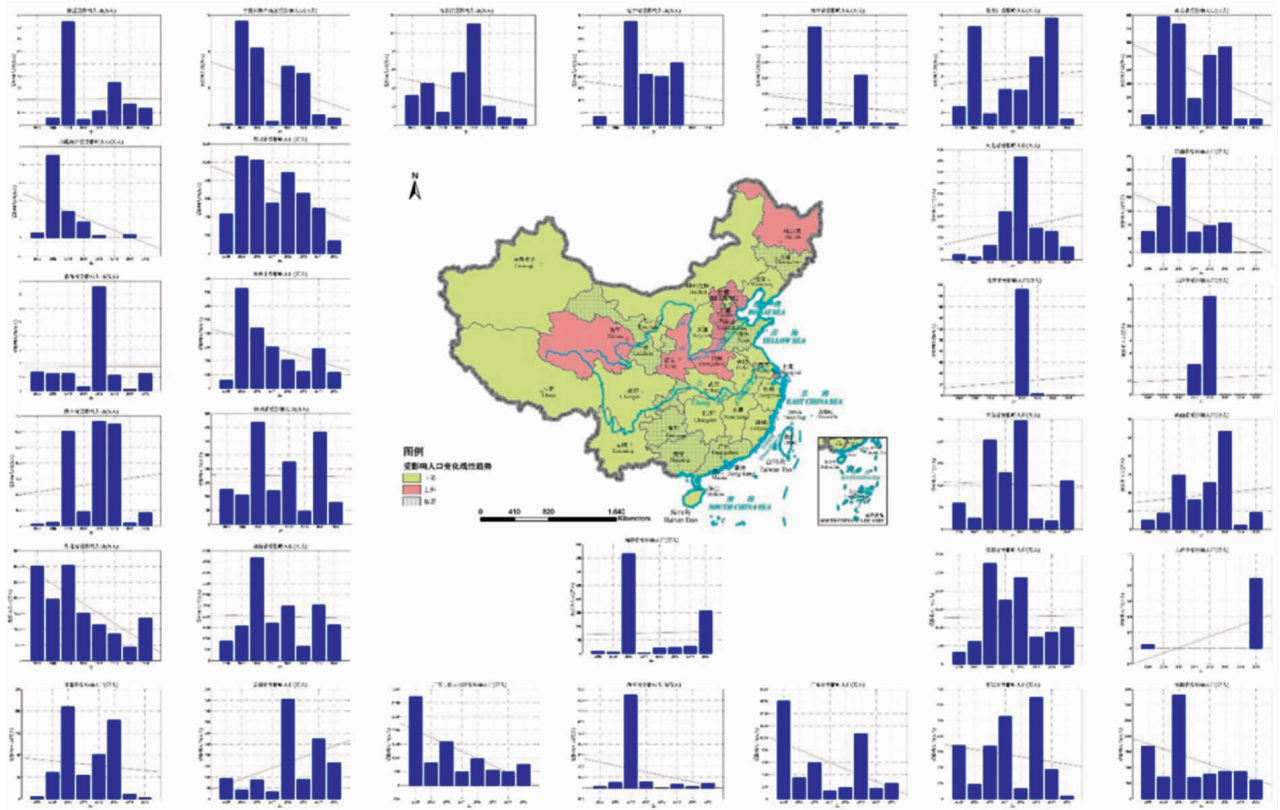


图4 2008-2015年中国省级尺度受极端降雨影响死亡人口的变化趋势

进一步从省级尺度来看, 2008-2015年各省极端降雨灾害受影响人口中6个省份呈增加趋势, 仅

河北极端降雨灾害受影响人口增加趋势通过了0.05显著性水平的检验(图3)。25个省份呈减少趋势,

甘肃、重庆、贵州、广西、广东、山东和吉林 7 个省份的极端降雨灾害受影响人口减少趋势通过了 0.05 显著性水平的检验。从死亡人口来看, 2008 – 2015 年全国有 12 个省份的极端降雨灾害死亡人口呈增加趋势, 仅河北、河南和安徽 3 省的增加趋势通过了 0.05 显著性水平的检验(图 4); 19 个省份的极端降雨灾害死亡人口呈减少趋势, 仅宁夏、贵州和广西的减少趋势通过了 0.05 显著性水平的检验。综上所述可以看出, 中国极端降雨灾害受影响人口和死亡人口较多的分布在东部季风区和人口稠密的地区。

3 中国极端降雨灾害受影响人口风险评估模型

基于对区域极端降雨灾害系统的认识, 本文在假定中国极端降雨灾害受影响人口风险系统变化是平稳马尔科夫随机过程条件下, 采用 2008 – 2015 年的中国极端降雨灾害受影响人口和死亡人口数据, 通过超越概率曲线即脆弱性模型构建中国省级尺度极端降雨灾害受影响人口损失模型。由于中国极端降雨灾害死亡人口较少, 本文将死亡人口和受影响人口合并, 统称为受影响人口。本文在构建超越概率曲线时采用的是参数拟合方

法, 主要包括高斯正态分布、Weibul 分布、gamma 分布、GEV 分布和 GP 分布。通过 Kolmogorov – Smirnov (KS) 检验判断中国 31 个省份极端降雨灾害受影响人口的最优拟合损失模型。

本文首先按照式(1)对 2008 – 2015 年 31 个省份极端降雨灾害受影响人口的历史数据进行订正。式中 $Popu$ 为每 10 万人中极端降雨受影响人口数, $Affpop_{(i,j)}$ 为某 i 年 j 省的极端降雨灾害受影响人口数; $pop_{(i,j)}$ 为某 i 年 j 省的人口总数; i 为 2005, 2006, …, 2015 年, j 为 {1, 2, 3, …, 31} 对应 31 个省级行政单位, 不含香港、澳门及台湾。

$$Popu = \frac{Affpop_{(i,j)}}{pop_{(i,j)}} \times 100000. \quad (1)$$

本文将 $Popu$ 转成自然对数后, 假设极端降雨灾害受影响人口符合高斯正态、Weibul、Gamma、GEV 及 GP 分布, 并利用 KS 检验挑选出 31 个省份的最优拟合函数(表 1)。表 1 中, 当 $H=0$ 时, KS 值越小即意味着模型拟合越好, 其中北京、天津及上海因样本量不够而与就近省份合并, 各省的最优参数模型, 具体参数详见表 2。从表 2 中可看出, 有 9 个省份的最优参数模型符合高斯正态分布; 6 个省份符合 Weibul 分布, 12 个省份符合 GEV 分布; 2 个省份符合 GP 分布。

表 1 不同省份极端降雨灾害受影响人口损失模型参数拟合统计表

分布类型	安徽		福建		甘肃		广东		广西		贵州		海南		京津冀*		河南		黑龙江	
	H	KS	H	KS	H	KS	H	KS	H	KS	H	KS	H	KS	H	KS	H	KS	H	KS
Gaussian	0	0.04	0	0.05	0	0.05	0	0.03	0	0.03	0	0.03	0	0.11	0	0.05	0	0.05	0	0.13
Weibul	0	0.04	0	0.05	0	0.06	0	0.05	1	0.05	1	0.06	0	0.10	0	0.06	0	0.05	0	0.14
Gamma	0	0.05	0	0.08	1	0.09	1	0.09	1	0.10	1	0.101	0	0.14	1	0.12	0	0.08	0	0.16
GEV	0	0.03	0	0.05	0	0.04	0	0.03	0	0.04	0	0.03	0	0.12	0	0.05	0	0.05	0	0.12
GP	1	0.25	1	0.14	1	0.15	1	0.17	1	0.18	1	0.18	1	0.35	1	0.18	1	0.17	0	0.08
分布类型	湖北		湖南		吉林		苏沪*		江西		辽宁		内蒙古		宁夏		青海		山东	
	H	KS	H	KS	H	KS	H	KS	H	KS	H	KS	H	KS	H	KS	H	KS	H	KS
Gaussian	0	0.02	0	0.03	0	0.09	0	0.06	0	0.02	0	0.08	0	0.07	0	0.10	0	0.10	0	0.06
Weibul	1	0.05	0	0.03	0	0.08	0	0.12	0	0.04	0	0.11	0	0.05	0	0.08	0	0.14	1	0.08
Gamma	1	0.10	1	0.08	0	0.10	1	0.17	1	0.09	1	0.16	0	0.08	0	0.12	0	0.16	1	0.12
GEV	0	0.04	0	0.03	0	0.09	0	0.05	0	0.03	0	0.07	0	0.05	0	0.10	0	0.10	0	0.04
GP	1	0.22	1	0.23	1	0.14	1	0.19	1	0.23	1	0.17	1	0.13	0	0.10	0	0.09	1	0.17
分布类型	山西		陕西		四川		西藏		新疆		云南		浙江		重庆					
	H	KS	H	KS	H	KS	H	KS	H	H	H	KS	H	KS	H	KS				
Gaussian	0	0.07	0	0.05	0	0.05	0	0.13	0	0	0	0.06	0	0.04	0	0.06				
Weibul	0	0.08	0	0.03	0	0.04	0	0.19	1	1	1	0.07	0	0.03	1	0.07				
Gamma	0	0.11	0	0.07	1	0.07	0	0.23	1	1	1	0.13	1	0.10	1	0.13				
GEV	0	0.06	0	0.04	0	0.04	0	0.14	0	0	0	0.04	0	0.05	0	0.04				
GP	1	0.17	1	0.16	1	0.12	0	0.20	1	1	1	0.20	1	0.19	1	0.20				

注: 北京、天津及上海因样本量少, 与就近省份合并, 表中加*标注

表 2 不同省份极端降雨灾害受影响人口的最佳损失模型

省份	最佳拟合概率分布	省份	最佳拟合概率分布
福建	Gaussian(3.19, 1.71)	安徽	GEV(-0.22, 1.66, 4.18)
广西	Gaussian(3.71, 1.68)	京津冀*	GEV(-0.32, 1.56, 2.93)
河南	Gaussian(3.17, 1.42)	甘肃	GEV(-0.23, 1.53, 2.53)
湖北	Gaussian(4.22, 1.76)	广东	GEV(-0.19, 1.51, 2.56)
湖南	Gaussian(4.21, 1.59)	贵州	GEV(-0.28, 1.61, 2.92)
江西	Gaussian(4.30, 1.74)	苏沪*	GEV(-0.34, 1.69, 3.30)
天津	Gaussian(5.01, 0.83)	辽宁	GEV(-0.41, 1.91, 3.57)
西藏	Gaussian(3.58, 1.89)	山东	GEV(-0.35, 1.64, 3.12)
浙江	Gaussian(3.88, 1.58)	山西	GEV(-0.37, 1.57, 2.92)
内蒙古	Weibul(3.05, 1.77)	四川	GEV(-0.19, 1.61, 2.68)
吉林	Weibul(4.11, 2.14)	云南	GEV(-0.19, 1.35, 2.12)
海南	Weibul(7.41, 5.06)	重庆	GEV(-0.39, 1.68, 3.79)
宁夏	Weibul(3.67, 1.81)	黑龙江	GP(-1.02, 5.43)
陕西	Weibul(4.38, 2.31)	青海	GP(-0.74, 4.74)
新疆	Weibul(2.78, 1.56)		

注: 北京、天津及上海因样本量少, 与就近省份合并, 表中加*标注。

4 两种情景下的极端降雨灾害受影响人口风险对比分析

4.1 两种情景下极端降雨灾害受影响人口风险空间格局

结合上述各省份的极端降雨灾害受影响人口模型, 本文基于 IPCC SSP3 路径模拟的 2050 和 2100 年中国各省人口数量, 评估了 10、20、50 和 100 年一遇的极端降雨受影响人口风险水平。对地球工程和非地球工程两种情景而言, 2050 年不同年遇型极端降雨强度下的受影响人口均呈东南高—西北低的空间格局, 且随着年遇型的增加, 两种情景下受影响人口的数量明显增加(图 5)。两种

情景下长江中下游流域地区是极端降雨灾害受影响人口风险最为明显和集中的地区。两种情景下, 当极端降雨强度增加到 100 年一遇时, 西北地区受影响人口风险开始增加, 但青藏高原和黑龙江依旧变化不大。

2100 年极端降雨灾害受影响人口风险在两种情景下也呈东南高—西北低的空间格局(图 6)。2100 年极端降雨灾害受影响人口风险随着极端降雨年遇型增加, 开始从黄淮东部、江淮东部和长江中下游地区开始向南和沿长江向西扩张。其中江西、安徽、湖北和湖南省在两种情景下遭遇 50 年一遇极端降雨时, 受影响人口风险明显高于其它省份。在遭遇 100 年一遇的极端降雨时, 除上述四省外, 广东、四川、陕西和吉林的受影响人口风险也明显增高。这种受影响人口的高风险分布特征可能不仅与人口分布密切相关, 而且也受极端降雨致灾因子的影响。人口承灾体和极端降雨致灾因子, 加之东部特殊的极端降雨孕灾环境导致了两种情景下的极端降雨灾害受影响人口风险的分布特征。

4.2 两种情景下极端降雨灾害受影响人口空间格局对比分析

为了进一步诊断地球工程对极端降雨灾害受影响人口的影响, 我们进一步对比了地球工程和非地球工程情景下的极端降雨灾害受影响人口风险的差异特征。从时间序列对比来看, 图 7 显示了 2020—2100 年地球工程和非地球工程情景下的中国极端降雨灾害整体受影响人口差异特征, 可以看出随着时间发展, 两种情景下的极端降雨灾害受影响人口首先在 2020—2030 年趋于增加, 而后在 2031—2100 年逐渐减少。尤其是值得注意的是地球工程情景下的 10、20、50 和 100 年一遇的极端降雨灾害受影响人口明显低于非地球工程, 这表明地球工程的实施有利于降低中国整体性的极端降雨灾害受影响人口风险, 且这种风险降低特征尤其在地球工程实施期间表现明显。地球工程实

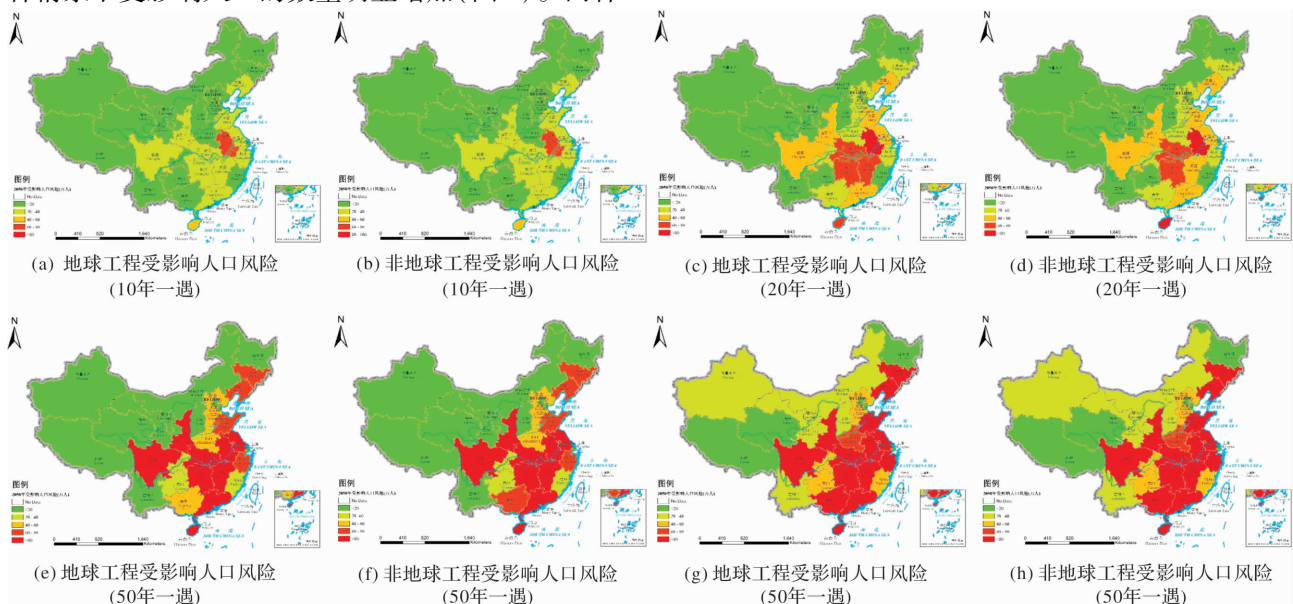


图 5 2050 年人口数量条件下地球工程和非地球工程极端降雨灾害受影响人口风险空间分布特征

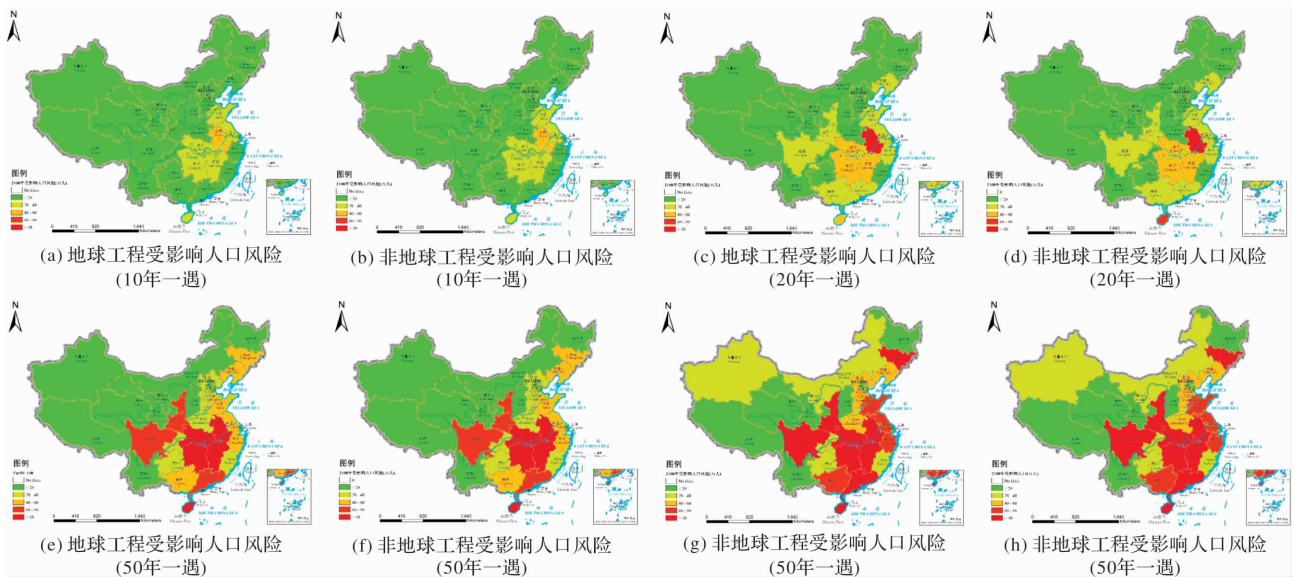


图6 2100年人口数量条件下地球工程和非地球工程极端降雨灾害受影响人口风险空间分布特征

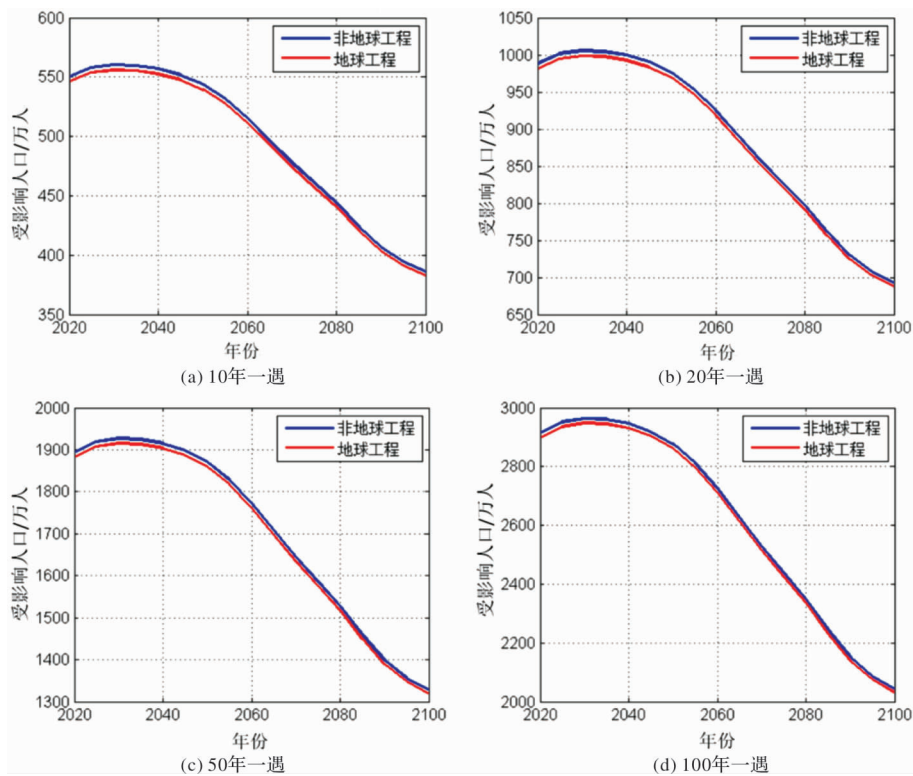


图7 2020-2100年两种情景下不同年遇型极端降雨强度下的受影响人口风险差异

施结束后的2070-2100年,这种风险降低特征仍然存在,但不如实施期间明显。在人口承灾体基本稳定的情况下,随着极端降雨年遇型的增加,中国整体性的极端降雨灾害受影响人口风险差异趋于减小,尤其是在地球工程实施结束后的2070-2100年,这在一定程度上进一步表明地球工程实施期间极端降雨致灾因子的差异性特征,也表明了地球工程整体减小了极端降雨灾害受影响人口的风险。我们将图7的变化趋势与预测的温室气体减排进行对比后发现,发现两者峰值时间大致吻合,都发生在2030年前后^[7,13]。这说明地球工

程对中国极端降雨灾害受影响人口风险的影响相对有限,不是影响中国气候变化风险的主导因素。但在此背景下地球工程相比非地球工程能够有效降低中国整体极端降雨灾害受影响人口风险。

从空间差异来看,我们采用地球工程情景下的中国极端降雨灾害受影响人口减去非地球工程情景,以此来表征地球工程对极端降雨灾害受影响人口风险的影响。据此,本文对比了2050和2100年两种情景下的中国极端降雨灾害受影响人口风险差异特征。从图8可以看出,2050年人口条件下,随着极端降雨年遇型的增加,地球工程

所造成的极端降雨灾害受影响人口增加和减少的省份都在不断增多, 极端降雨灾害受影响人口增加的省份主要集中在广东至甘肃连线的省份上, 极端降雨灾害受影响人口减少的省份则分布零散, 相对而言西南省份较为集中。这种空间分异特征可能是由于两种情景下的极端降雨致灾因子的较大差异, 叠加在省际人口差异上造成的。图 9 展示了 2100 年人口条件下的不同年遇型极端降雨灾害受影响人口风险, 同样随着极端降雨年遇型的增加, 地球工程相比非地球工程而言, 极端降雨灾害受影响人口增加和减少的省份均呈增加态势, 空间分布特征与图 8 中的 2050 年空间分布具有相似性。值得注意的是 2100 年极端降雨灾害受影响人口增加的省份相比 2050 年有所减少, 且部分区域发生变化。这可能是由于 2100 年时地球工程已经停止实施 30 年, 两种情景下的致灾因子趋于相同, 但 2100 年相比 2050 年的人口分布却有较大差异, 即省际人口差异特征差异增大。因此, 导致两种情景下的极端降雨灾害受影响人口的区域差异产生。

综上可知, 地球工程整体上有助于中国整体极端降雨灾害受影响人口风险的降低, 但却加剧了区域差异, 使得极端降雨灾害受影响人口风险增加和减少的省份都趋于增多。在地球工程实施的 2020–2069 年期间, 中国整体极端降雨灾害受影响人口风险降低明显高于 2070–2100 年。

5 结论和讨论

5.1 结论

本文主要结论如下: ①2020–2100 年地球工程和非地球工程情景下的中国整体极端降雨灾害受影响人口风险先增高后降低, 大致在 2030 年达到风险最高值, 与预测的温室气体减排峰值时间大致吻合。整体来看, 地球工程的实施能够有效降低中国整体极端降雨灾害受影响人口风险, 且

实施期间的降低作用高于实施结束期。但地球工程不是决定未来中国极端降雨灾害风险的主导因素。②随着极端降雨年遇型的增加, 地球工程和非地球工程情景下未来中国极端降雨灾害受影响人口风险的区域绝对差异增大, 但相对风险格局基本不变。在 2050 年人口条件下, 正值地球工程实施期间, 致灾因子危险性和承灾体的区域差异决定了灾害风险格局; 在 2100 年条件下人口条件下, 地球工程实施结束, 致灾因子趋于相同, 承灾体的区域差异决定了灾害风险格局。这说明了地球工程对中国极端降雨灾害受影响人口影响的时空有限性。

5.2 讨论和展望

(1) 地球工程实施前后的风险差异讨论。本文的地球工程对中国极端降雨灾害受影响人口风险的定量分析表明地球工程实施期间确实改变了承灾体的风险格局, 而地球工程结束后, 干预气候的人为扰动逐步减小, 两种情景下的极端降雨灾害受影响人口风险差异缩小, 并趋于相同。这在一定程度上表明在目前 GeoMIP 模式设定的地球工程实施当量下, 大气环境在地球工程实施结束后能够在短时间内恢复原有水平, 从而保证原有的区域灾害风险分布保持原有格局^[8]。同时也不仅佐证了 IPCC 在 1999 年提出的航空器尾气排放对全球气候影响的结论^[8,18], 也支持了 IPCC AR5 中第三工作组关于地球工程对气候影响的结论^[13], 反之, 两次评估报告的结论也支持了地球工程在中国区域的结论。

(2) 地球工程实施的数值模拟价值。地球工程从提出以来经历了诸多政策讨论, 而从数据出发的定量探讨相对较少, 尤其在中国更少。地球工程作为一种人类治理气候变化的低成本有效手段, 具有短期性和应急性。在人类发展的前提下, 未来不同发展路径的选择决定了未来气候变化的特征, 从而导致灾害风险格局产生波动和变化。因此, 十分必要从数值模拟角度开展地球工程实施的

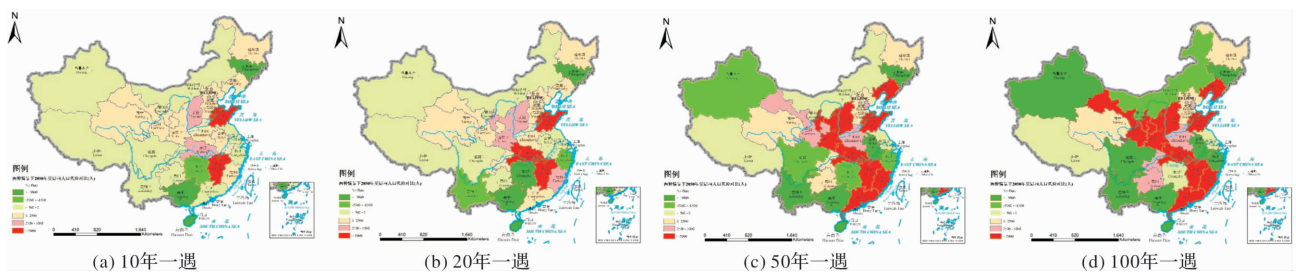


图 8 2050 年人口数量条件下两种情景极端降雨灾害受影响人口风险空间差异

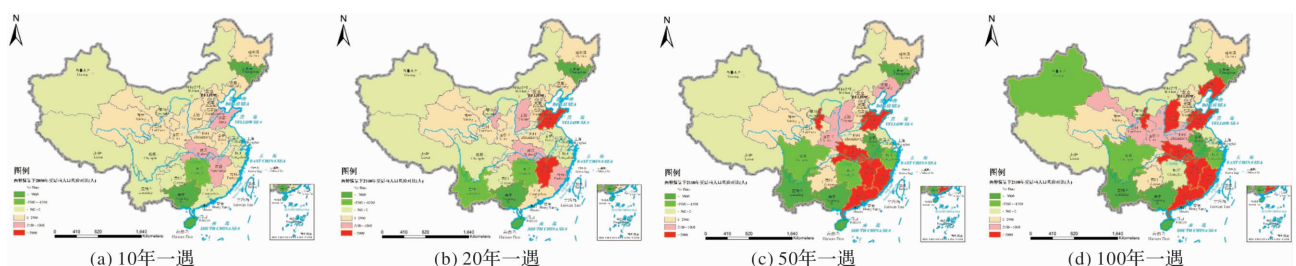


图 9 2100 年人口数量条件下两种情景极端降雨灾害受影响人口风险空间差异

灾害风险评估,这对于未来区域命运共同体建设和可持续发展具有重要意义。加之中国在人工影响天气领域实力雄厚,尽早开展地球工程的数值模拟对于中国在未来全球气候谈判和气候治理居主导地位具有十分重要的现实意义。

(3)亟待开展多模式集合的地球工程试验下的多要素多尺度灾害风险评估与对比分析。本文仅基于 BNU-ESM 的地球工程结果开展中国极端降雨灾害受影响人口风险分析,这仅仅是一个开始,远不能满足国家政策咨询的需求。仍需要集合多模式开展多排放情景下的地球工程数值模拟,同时结合国家政策制定需求的多种承灾体要素,从时空多尺度开展灾害风险评估和区域对比分析。这对于深入理解地球工程及其影响下的灾害风险变化具有重要科学价值。

参考文献:

- [1] Pidgeon N, Parkhill K, Corner A, et al. Deliberating stratospheric aerosols for climate geoengineering and the SPICE project[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(5): 451-457.
- [2] Bengtsson L. Geo-engineering to confine climate change: Is it at all feasible? [J]. *Climatic Change*, 2006, 77(3): 229-234.
- [3] 潘家华. "地球工程"作为减缓气候变化手段的几个关键问题[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(5): 22-26.
- [4] 曹志杰,陈绍军,史明宇. 气候变化条件下的气候工程移民问题及对策分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(S3): 32-35.
- [5] Shepherd J, Iglesias-Rodríguez D, Yool A. Geo-engineering might cause, not cure, problems [J]. *Nature*, 2007, 449(7164): 781.
- [6] Curry C L, Sillmann J, Bronaugh D, et al. A multi-model examination of climate extremes in an idealized geoengineering experiment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119(7): 3900-3923.
- [7] 孔锋,孙劭,史纬恒,等. 气候工程对中国极端降水强度影响的研究[J]. *灾害学*, 2018, 33(2): 106-113.
- [8] 辛源. 地球工程情景下的中国气象灾害风险研究[D]. 北京: 中国社会科学院研究生院, 2017.
- [9] Galaz V. Geo-engineering, governance, and social-ecological systems: Critical issues and joint research needs [J]. *Ecology & Society*, 2012, 17(1): 293-303.
- [10] Kashimura H, Abe M, Watanabe S, et al. Shortwave radiative forcing, rapid adjustment, and feedback to the surface by sulfate geoengineering: analysis of the Geoengineering Model Intercomparison Project G4 scenario [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2017, 17(1): 1-22.
- [11] IPCC SREX. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation [R]. London: Cambridge University Press, 2012.
- [12] 孔锋,史培军,方建,等. 全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J]. *灾害学*, 2017, 32(2): 165-174.
- [13] IPCC AR5. Intergovernmental panel on climate change climate change fifth assessment report (AR5) [R]. London Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013.
- [14] 孔锋,王一飞,吕丽莉,等. 近百年来全球、大洲和区域尺度降雨时空变化诊断(1900-2010) [J]. *灾害学*, 2018, 33(1): 81-88.
- [15] 孔锋,刘凡,王一飞,等. 中国气候变化与水灾发生频次的时空关系研究(1961-2010) [J]. *灾害学*, 2017, 32(4): 35-42.
- [16] 孔锋,吕丽莉,方建,等. 中国空气污染指数时空分布特征及其变化趋势(2001-2015) [J]. *灾害学*, 2017, 32(2): 117-123.
- [17] 孔锋,代光烁,李曼,等. 中国不同历时霾日数时空变化特征及其与城镇化和风速的关联性研究(1961-2015) [J]. *灾害学*, 2017, 32(3): 63-70.
- [18] Ji D, Wang L, Feng J, et al. Basic Evaluation of Beijing Normal University Earth System Model (BNU-ESM) Version 1 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2014, 7(5): 2039-2064.
- [19] Corner A, Pidgeon N. Geoengineering the climate: the social and ethical implications. [J]. *Environment Science & Policy for Sustainable Development*, 2010, 52(1): 24-37.
- [20] Jones A, Haywood J, Boucher O. A comparison of the climate impacts of geoengineering by stratospheric SO₂ injection and by brightening of marine stratocumulus cloud [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2011, 12(2): 176-183.
- [21] 柳琴,史军. 气候地球工程的伦理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [22] 孙凯. 对地球工程的多维度思考——读《气候变化地球工程: 哲学视角、法学议题与治理框架》[J]. *世界环境*, 2013, 31(5): 91-92.
- [23] Barrett S. Solar geoengineering's brave new world: thoughts on the governance of an unprecedented technology [J]. *Review of Environmental Economics & Policy*, 2015, 8(2): 249-269.
- [24] Heyen D, Wiertz T, Irvine P J. Regional disparities in SRM impacts: the challenge of diverging preferences [J]. *Climatic Change*, 2015, 133(4): 557-563.
- [25] Irvine P J, Ridgwell A, Lunt D J. Assessing the regional disparities in geoengineering impacts. [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 36(37): 89-90.
- [26] Gardiner S M. Why geoengineering is not a 'global public good', and why it is ethically misleading to frame it as one [J]. *Climatic Change*, 2013, 121(3): 513-525.
- [27] Millstein D, Menon S. Regional climate consequences of large-scale cool roof and photovoltaic array deployment [J]. *Environmental Research Letters*, 2011, 49123(6): 198-204.
- [28] 张莹,陈迎,潘家华. 气候工程的经济评估和治理核心问题探讨[J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12(5): 442-449.
- [29] 柳琴,史军,李超. 气候地球工程的政治影响[J]. *阅江学刊*, 2016, 8(1): 26-31.
- [30] 陈迎,辛源. 1.5℃温控目标下地球工程问题剖析和应对政策建议[J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13(4): 337-345.
- [31] 姜彤,赵晶,景丞,等. IPCC 共享社会经济路径下中国和分省人口变化预估[J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13(2): 128-137.
- [32] 孔锋,吕丽莉,方建. 农业巨灾风险评估理论和方法研究综述和展望[J]. *保险研究*, 2016, 37(9): 103-116.
- [33] 吴绍洪,潘韬,刘燕华,等. 中国综合气候变化风险区划[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 3-17.
- [34] 李响,刘克修,董军兴,等. 中国沿海海平面上升风险区划方法研究[J]. *海洋预报*, 2014, 31(2): 41-49.

(下转第 134 页)